

某轴流式水轮机叶片刚强度及模态有限元分析

张亚楠

浙江富春江水电设备有限公司

摘 要: 采用 ANSYS 对某轴流式水轮机叶片进行了刚强度和模态的仿真分析, 分析了开设应力释放槽前后, 应力及固有频率的变化, 结果表明应力释放槽可以显著减小叶片根部大应力区域的范围, 同时应力释放槽以及叶片根部减薄对固有频率有一定的调整作用。

关键词: ANSYS; 叶片; 刚强度; 模态; 有限元法

Abstract: The stiffness and strength and modal of axial-flow hydraulic turbine blade is simulated by ANSYS. The influence of U notch to the stress, deformation and nature frequency is calculated. The results show that U notch effectively reduces the area of high stress at the root of blade, and adjust the nature frequency together with the reduction of fillet radius at root.

Key words: ANSYS; Blade; Stiffness and Strength; Modal; Finite element method

1. 前言

水轮机是一种将水能转换为转轮旋转能量的机器。其中, 轴流式水轮机近年来有很大发展, 使用也很广。水轮机叶片是水轮发电机的核心部件, 关系到整个机组的效率和运行的稳定性。叶片在水轮机正常运行时, 必须具有良好的刚强度性能, 不会产生裂纹、断裂等现象, 不会出现较大变形而导致与转轮室发生刮擦; 叶片的水中频率需要避开活动导叶的过流频率, 避免发生共振。

由于水轮机在旋转运行过程中, 受力状态较为复杂。本文利用有限元软件 ANSYS 对某轴流式水轮机叶片在最大水头最大出力工况下的刚强度进行了计算分析, 发现该叶片根部存在较大的高应力区域; 同时对该叶片进行了模态分析, 发现水中第二阶固有频率与活动导叶的过流频率接近, 叶片有共振的风险。考虑到共振的危害更为危险, 所以主要针对叶片的固有频率对叶片结构进行了调整, 同时降低应力。通过将叶片根部两侧各挖一个 U 形槽, 同时增大根部倒角半径并将根部倒圆减薄, 计算结果表明, 虽然应力峰值有所增加, 但高应力区域面积明显缩小, 叶片水中固有频率避开了激励频率。

2. 有限元计算

2.1 有限元计算模型

轴流式水轮机由转轮体、操作机构和叶片组成, 叶片通过根部法兰外环面与转轮体配合, 根部法兰端面与操作机构装配联接, 并存在一定叶片开度, 成圆周周期分布。根据结构的周期性, 可取单个的叶片模型进行计算, 无槽叶片有限元模型及开设 U 槽、减薄叶片根部倒圆的模型如图 1 所示。

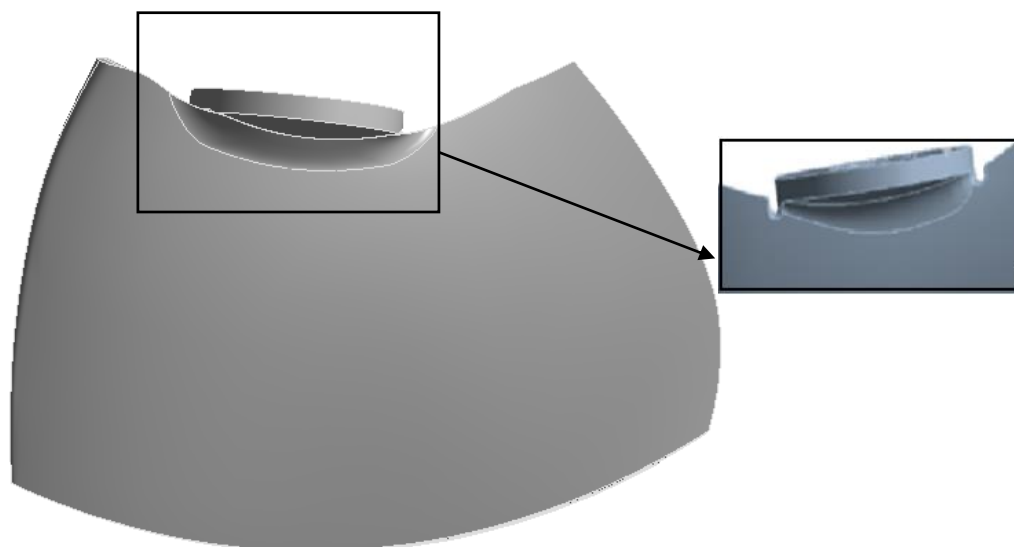


图 1 未开槽叶片及 U 形叶片槽模型

叶片表面呈现为曲面，为了保证计算结果的精度，采用带中节点四面体单元划分。单元形式如图 2 所示。由于叶片根部区域存在应力集中，因此将叶片根部倒圆位置网格进行细化，在叶片根部区域采用 10mm 网格尺寸划分，其他位置采用 35mm 尺寸划分，形成 648659 个单元，945514 个节点。

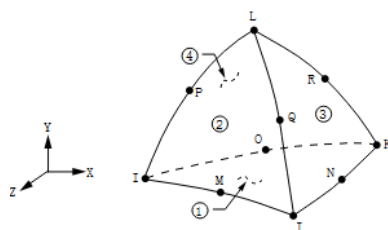


图 2 三维 10 节点等参单元

2.2 叶片应力计算结果

最大水头最大出力工况下，无槽模型应力云图如图 3 左所示，在叶片与根部法兰连接的位置存在一个较为明显的高应力区域。U 槽模型应力云图如图 3 右所示，在叶片根部正面出水侧的 U 槽边缘位置存在应力集中，但是高应力区域范围大大减小。将无槽以及 U 槽模型的叶片根部正面与法兰连接位置从右至左取 10 个数据点，画出根部倒圆位置处的应力分布曲线图，如图 4 所示。

由图 4 中对比可以发现，根部倒圆减薄、开 U 槽的叶片模型与无槽模型相比，等效应力整体水平下降；但 U 槽边缘位置的应力集中要比无槽模型的应力集中数值高 10MPa 左右，其中一个主要因素是考虑到固有频率与活动导叶接近，将叶片根部做了减薄处理。对于 U 槽边缘应力集中问题后期可以采用增大槽边圆角半径等措施，降低其应力水平。

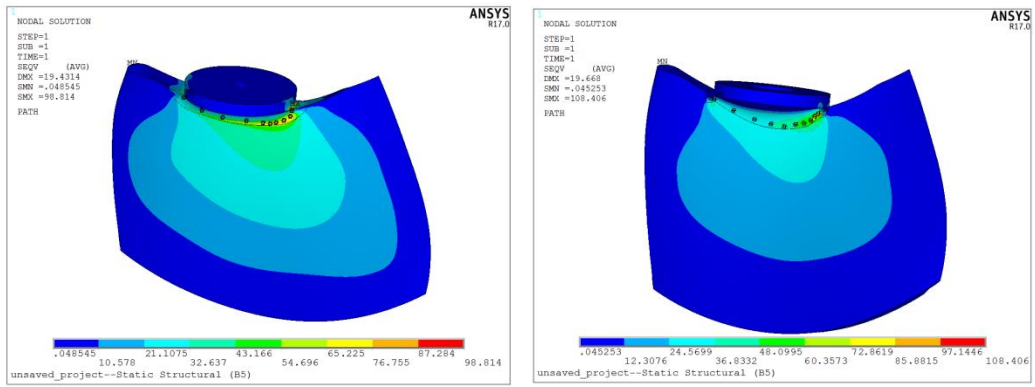


图3 无槽叶片（左）及U槽叶片（右）最大水头最大出力工况应力云图

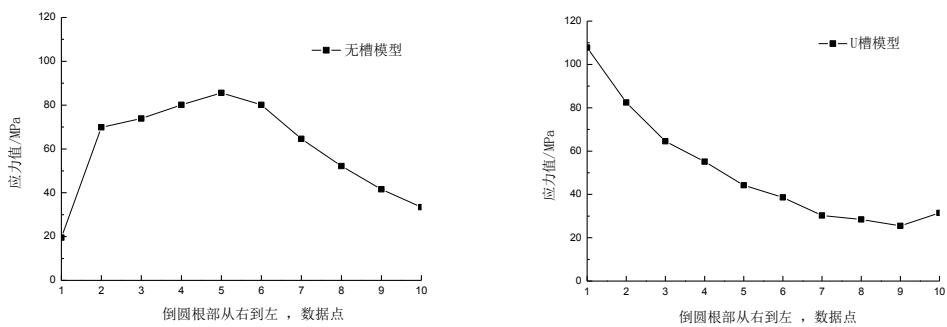


图4 无槽叶片（左）及U槽叶片（右）根部倒圆应力分布曲线

2.3 叶片变形计算结果

由图5可知，叶片在最大水头最大出力的工况下，无槽叶片与U槽叶片的整体变形趋势一致，均在叶片正面的出水侧形成一块向外凸出的区域；对于叶片最外缘的变形，变形量均在0.5mm以内，小于转轮叶片与转轮室间的运行间隙，不会导致对转轮室的刮擦行为。但是，由于U槽的开设以及根部倒圆的减薄，降低了叶片与法兰连接刚度，径向变形从0.33124mm增加到了0.33398mm，然此变形量的改变对结构不会产生任何影响。

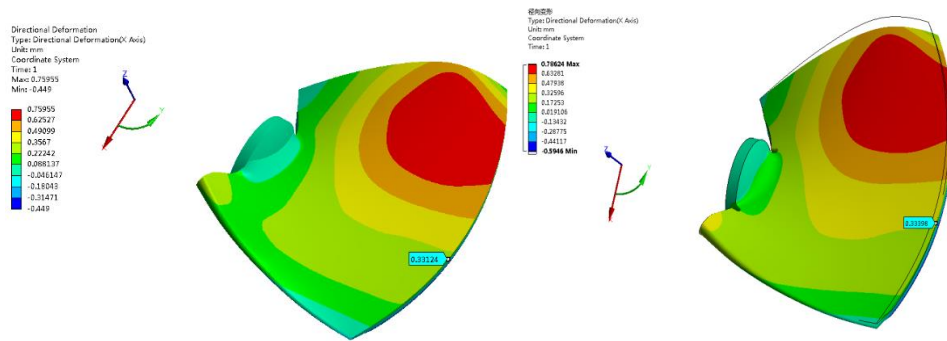


图5 无槽叶片（左）与U槽叶片（右）径向变形

2.4 叶片模态分析

叶片结构动力学的研究方法主要是对其进行模态分析。模态分析可以求解得到叶片的固有频率和特征振型，固有频率可以有助于我们了解叶片的整体刚度及变形情况，从特征振型中可以观察到某一个固有频率下，叶片的变形趋势。

轴流式水轮机叶片是一个空间翘曲悬臂的薄板结构，为了提高计算效率，采用子空间迭代法对无槽、U 槽模型进行模态分析。叶片的水中模态使用流固耦合的方法进行计算。

表 1 空气中与水中模态

	无槽模型		U 槽模型	
	空气中/Hz	水中/Hz	空气中/Hz	水中/Hz
第一阶	30.81	19.28	29.63	18.32
第二阶	45.89	31.92	43.35	29.78
第三阶	65.28	47.31	63.21	44.72

水轮机在运行过程中，为了避免叶片与其他部件产生共振，转轮叶片需要避开活动导叶的过流频率。无槽叶片水中第二阶固有频率与机组活动导叶的过流频率角接近，存在发生共振的危险，因此采用 U 槽模型、根部倒圆减薄的方法，降低叶片水中的第二阶固有频率，使其频率从 31.92 降为 29.78Hz。

3. 结论

由以上计算结果可知，叶片根部两侧开设 U 形槽、将根部倒圆减薄，可以有效的降低叶片的固有频率，本次模态计算中，第二阶固有频率下降达 2.1Hz，避开了活动导叶过流频率，有效地防止了共振的发生。

对于应力结果，增加 U 形应力释放槽，虽然会增加局部应力峰值，但是能大大减小叶片根部高应力区域的范围。

此次分析过程表明，有限元仿真对于水轮机叶片的刚强度及模态的分析计算可以有效的缩短设计周期，重点狙击潜在问题，达到高效优化的目的。

参考文献

- [1] 哈尔滨大电机研究所，水轮机设计手册[M]，北京：机械工业出版社，1976
- [2] 陈国强,王乘,姬晋廷,轴流式水轮机叶片刚度和强度有限元分析[J],机械强度,2003,25,(6), 690-693
- [3] 王勖成,邵敏,有限元单元基本原理和数值方法[M]，北京：清华大学出版社，1997
- [4] S Moaveni, Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS (3rd Edition)[J], Prentice-Hall, Inc, 2007 , 9 (1) :136-41.
- [5] 周大燕，流体力学与流体机械，北京：中国建筑工业出版社，1994